

8. Виданов, С.Н. Применение полиуретанового покрытия BASF OLDODUR WS 56 для ремонта систем водоотведения [Электронный ресурс] / С.Н. Виданов, Ю.С. Захаров. – Режим доступа: <http://www.ooo3s.ru>.
9. Бакаленко, А.И. Полимерные технологии Линабонд. Опыт применения при реконструкции сооружений системы водоснабжения и водоотведения [Текст] / А.И. Бакаленко // Технологии Мира. – 2012. - №05 (43). – С.37-42.
10. Латыпов, В.М. Рациональные способы подготовки поверхности бетона при ремонте конструкций после деструктивного воздействия серосодержащих соединений [Текст] / В.М. Латыпов, Т.В. Латыпова, А.Н. Авренюк // Известия КазГАСУ. – 2009. - №1 (11). – С.277-283.

### Abstract

*In the article it is defined the modern problems of municipal systems of waste water networks which are related with their long time of maintenance in terms of biologically and chemically aggressive environment. It is shown that nowadays the most effective methods of increasing reliability and ecological safety of concrete reinforced deep laid pipelines as well as methods of increasing their maintenance time are the technologies of trenchless modernization with use of polymeric compound materials. It is offered technology of applying polymeric compositions on the inner surface of pipeline of large diameter that allows to obtain glue and protective coatings during trenchless recovery and repair*

**Keywords:** *waste water networks, ecological safety, trenchless technologies, biogenic corrosion, protective polymeric compositions*

*У статті розглянуті основні проблеми в сфері автоматизованого керування вентиляцією на гірничодобувних підприємствах, проведено аналіз найбільш популярних систем контролю шахтної вентиляційної мережі (UTAC, Granch), виявлено їх переваги і недоліки. На базі проведеного аналізу розроблена динамічна модель прогнозу стану атмосфери тупикових вибоїв шахт*

**Ключові слова:** *шахта, вентиляція, граф, провітрювання, вироблення, моделювання*

*В статье рассмотрены основные проблемы в сфере автоматизированного управления вентиляцией на горнодобывающих предприятиях, проведен анализ наиболее популярных систем контроля шахтной вентиляционной сети (UTAC, Granch), выявлены их достоинства и недостатки. На базе проведенного анализа разработана динамическая модель прогноза состояния атмосферы тупиковых забоев шахт*

**Ключевые слова:** *шахта, вентиляция, граф, проветривание, выработка, моделирование*

УДК 004.89

# ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ ТУПИКОВЫХ ЗАБОЕВ ШАХТ

**А. Н. Шуш ура**

Кандидат технических наук\*

Контактный тел.: 050-470-15-67

E-mail: [leshu@i.ua](mailto:leshu@i.ua)

**Р. В. Добров \***

Контактный тел.: 050-913-48-25

E-mail: [ruslandobrov@mail.ru](mailto:ruslandobrov@mail.ru)

\*Кафедра компьютеризированных систем управления  
Донецкий национальный технический университет  
пр. Богдана Хмельницкого, 84,  
г. Донецк, Украина, 83114

## 1. Введение

Производственные процессы на горнодобывающих предприятиях сопровождаются выделением в воздух вредных для человека газов и паров, таких как: метан, оксид углерода, сероводород, диоксид углерода и другие. Для безопасной работы горняков содержание вредных газов и паров в воздухе рабочей зоны не должно превышать предельно допустимой концентрации. Поддержание безопасного уровня атмосферы в шахте осуществляется путем вентиляции, в частности уста-

новкой главных вентиляторных установок и местных вентиляторных установок.

Выбросы опасных для жизни газов в атмосферу шахты могут быть спонтанными и в больших количествах. Для решения этой проблемы необходимо использовать автоматизированную систему в управлении вентиляцией. Это позволит наискорейшим способом ликвидировать газовый выброс и предотвратить аварийную ситуацию.

Наибольший расход электроэнергии при эксплуатации рудников и шахт приходится на вентиляцию. На типичном подземном руднике до одной трети от

общего числа энергопотребления уходит на систему вентиляции. Сокращение производственных расходов является путем повышения эффективности горно-добывающего предприятия. Автоматизированная система управления вентиляцией представляется на сегодня единственным вариантом решения данной задачи, способным не только сократить расходы, но и увеличить прибыль предприятия за счет улучшения показателей общей производительности.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Решением задачи автоматизации вентиляторных установок и уменьшением энергозатрат занимались такие ученые как: Б.Х. Богопольский, М.А. Левин, К.П. Бочаров, М.В. Бакшт, Е.А. Шутов, Т.Е. Турукина, С.А. Тимухин, Г.А. Бабак, Н.Н. Петров, Н.С. Фесенко.

На сегодняшний день уже существуют системы, решающие задачу автоматизации управления вентиляцией шахт: УТАС [1] и Granch МИС [2].

Несмотря на все достоинства, приведенные системы имеют ряд недостатков:

- стоимость и монтаж систем слишком велики для малых и средних шахт;
- для обслуживания систем требуются высококвалифицированные специалисты;
- при превышении допустимой нормы содержания метана в точке горной выработки анализатор метана выключает энергию с контролируемого участка, но не осуществляет ликвидацию газового выброса;
- существующие системы проветривания не являются автоматическими, а лишь предоставляют удобный интерфейс отслеживания состояния шахтой атмосферы для диспетчера, все управляющие решения принимает диспетчер.

Для решения большей части указанных проблем необходим математический аппарат, который бы позволял прогнозировать состояние атмосферы забоя в динамике развития ситуации. Обзор существующих подходов к моделированию вентиляции забоев позволил сделать вывод о том, что имеющиеся математические модели относятся к классу статических, поэтому дальнейшие исследования в этой области актуальны.

## 3. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является снижение аварийности и энергозатрат на горнодобывающих предприятиях за счет использования автоматизированной системы для управления вентиляцией. Поставленная цель достигается посредством системы управления местными вентиляторными установками, которая не будет зависеть от уровня квалификации персонала.

Для достижения данных целей необходимо решить следующие задачи:

- формализовать структуру вентиляционной системы шахты;
- разработать динамическую модель прогноза состояния атмосферы тупикового забоя шахты;

- провести численное исследование моделей и алгоритмов.

## 4. Логико-формальная модель структуры вентиляционной системы шахты

Формализация структуры вентиляционной системы шахты основана на ее представлении в виде графа. На рис. 1 представлен пример графа для структурной схемы вентиляционной сети шахты «Комсомолец Донбасс».

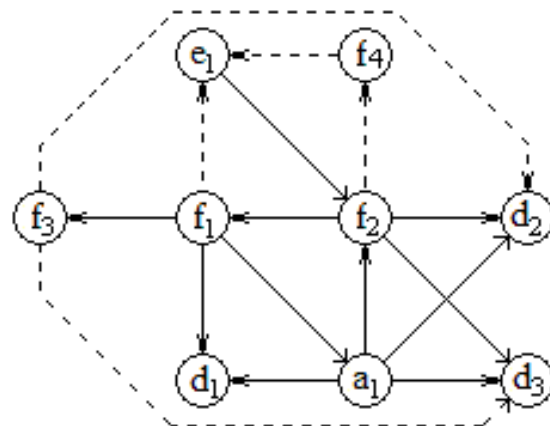


Рис. 1. Фрагмент графа вентиляционной системы

Как видно на рис.1, граф состоит из некоторого множества вершин и дуг. Вершины графа относятся к одному из множеств:

1. А – множество тупиковых забоев.
2. D – множество подземных вакуумных станций.
3. E – множество главных вентиляционных установок.
4. F – множество вентиляторов местного проветривания.

Дуги обозначают вентиляционные стволы. Использование дуг двух типов (сплошных и штриховых) обусловлено наглядностью отображения процесса проветривания, сплошное ребро – свежая струя воздуха, пунктирное ребро – отработанная.

Для каждого забоя  $a_i \in A$  на основе связей по дугам графа можно выделить подмножества  $D_i \subseteq D$  и  $F_i \subseteq F$  вентиляторных установок, производящих поставку воздуха в забой и осуществляющих его дегазацию.

Решение задачи сокращения затрат на вентиляцию при сохранении нормальных условий работы персонала требует разработки динамической модели прогноза состояния атмосферы в забое.

## 5. Синтез математической модели динамики состояния атмосферы забоя

Для разработки модели необходимо провести анализ процесса проветривания забоя и формализовать математические зависимости.

Схема процесса проветривания рабочей зоны тупикового забоя представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема процесса проветривания забоя

Как видно на рис. 2, в объекте моделирования можно выделить следующие зоны:

- забой (рабочая зона);
- воздухопроводный путь (входящий);
- воздухопроводный путь (исходящий).

В рабочей зоне необходимо проводить оценку содержания следующих газов: метана, кислорода, оксида углерода, оксида азота, двуокиси углерода, сероводорода, сернистого газа, аммиака и водорода.

Входящие и исходящие воздухопроводные пути характеризуются определенным потоком движения воздушных масс, задаваемым мощностью двигателей насосных установок, что формирует управляющие переменные задачи.

Пусть проветривание тупикового забоя осуществляется нагнетательным способом. Будем считать, что атмосфера забоя однородна, забой находится в состоянии нормальной работы.

Исходя из этих допущений, сформированы уравнения модели, описывающие изменение содержания основных газов атмосферы забоя  $a_i \in A$ .

Изменение содержания метана  $CM_i$  в забое  $a_i \in A$  определяется уравнением:

$$\frac{dCM_i}{dt} = r_i(t) \cdot kr_{CH_4} - k_{CH_4}^i \cdot \rho_{CH_4} \cdot V_i^{OT}(t), \quad (1)$$

где  $r_i(t)$  – поступление рудничного газа из горных пород;  $kr_{CH_4}$  – концентрация (доля) метана в общем объеме рудничного воздуха;  $k_{CH_4}^i$  – концентрация метана в забое  $a_i \in A$ ;  $\rho_{CH_4}$  – плотность метана ( $0,72 \text{ кг/м}^3$ );  $V_i^{OT}(t)$  – объем откачки воздуха вентиляторами  $D_i \subseteq D$ .

Динамика изменения содержания кислорода  $CK_i$ :

$$\frac{dCK_i}{dt} = d_i(t) \cdot k_{V_{O_2}} \cdot \rho_{возд} - x_i(t) \cdot g_{потр} - k_{O_2}^i \cdot V_i^{OT}(t) \cdot \rho_{O_2}, \quad (2)$$

где  $d_i(t)$  – поступление воздуха через вентиляторы  $F_i \subseteq F$ ;  $k_{V_{O_2}}$  – концентрация кислорода в поступающем воздухе;  $x_i(t)$  – количество людей, работающих в забое (в ед. времени);  $g_{потр}$  – количество потребляемого кислородом одним человеком;  $k_{O_2}^i$  – концентрация кис-

лорода в забое;  $\rho_{возд}$  – плотность воздуха ( $1,29 \text{ кг/м}^3$ );  $\rho_{O_2}$  – плотность кислорода ( $1,42897 \text{ кг/м}^3$ ).

Изменение количества оксида углерода  $CY_i$ :

$$\frac{dCY_i}{dt} = r_i(t) \cdot kr_{CO} + rd_i(t) \cdot krd_{CO}^i - k_{CO}^i \cdot V_i^{OT}(t) \cdot \rho_{CO}, \quad (3)$$

где  $kr_{CO}$  – концентрация оксида углерода в общем объеме рудничного воздуха;  $rd_i(t)$  – газ, образующийся в результате работы двигателя внутреннего сгорания в забое  $a_i \in A$ ;  $krd_{CO}^i$  – концентрация оксида углерода в газе, образованном двигателем внутреннего сгорания;  $k_{CO}^i$  – концентрация оксида углерода в забое  $a_i \in A$ ;  $\rho_{CO}$  – плотность оксида углерода ( $1,25 \text{ кг/м}^3$ ).

Изменение содержания окислов азота  $CA_i$ :

$$\frac{dCA_i}{dt} = r_i(t) \cdot kr_{NO} - k_{NO}^i \cdot V_i^{OT}(t) \cdot \rho_{NO}, \quad (4)$$

где  $kr_{NO}$  – концентрация (доля) окислов азота в общем объеме рудничного воздуха;  $k_{NO}^i$  – концентрация окислов азота в забое  $a_i \in A$ ;  $\rho_{NO}$  – плотность оксида азота ( $1,3402 \text{ кг/м}^3$ ).

Динамика двуокиси углерода  $CU_i$ :

$$\frac{dCU_i}{dt} = r_i(t) \cdot kr_{CO_2} + rd_i(t) \cdot krd_{CO_2}^i - k_{CO_2}^i \cdot V_i^{OT}(t) \cdot \rho_{CO_2}, \quad (5)$$

где  $kr_{CO_2}$  – концентрация двуокиси углерода в общем объеме рудничного воздуха;  $rd_i(t)$  – газ, образующийся в результате работы двигателя внутреннего сгорания;  $krd_{CO_2}^i$  – концентрация двуокиси углерода в газе, образованном двигателем внутреннего сгорания;  $k_{CO_2}^i$  – концентрация двуокиси углерода в забое  $a_i \in A$ ;  $\rho_{CO_2}$  – плотность двуокиси углерода ( $1,839 \text{ кг/м}^3$ ).

Динамика количества сероводорода  $CS_i$  определяется уравнением:

$$\frac{dCS_i}{dt} = sv_i(t) \cdot ksv_{H_2S}^i + r_i(t) \cdot kr_{H_2S} - k_{H_2S}^i \cdot V_i^{OT}(t) \cdot \rho_{H_2S}, \quad (6)$$

где  $sv_i(t)$  – общий объем веществ, который выделяется шахтными водами забоя  $a_i \in A$ ;  $ksv_{H_2S}^i$  – концентрация сероводорода в шахтных водах;  $kr_{H_2S}$  – концентрация (доля) сероводорода в общем объеме рудничного воздуха;  $k_{H_2S}^i$  – концентрация сероводорода в забое  $a_i \in A$ ;  $\rho_{H_2S}$  – плотность сероводорода ( $1,54 \text{ кг/м}^3$ ).

Изменение количества сернистого газа  $CG_i$ :

$$\frac{dCG_i}{dt} = r_i(t) \cdot kr_{SO_2} - k_{SO_2}^i \cdot V_i^{OT}(t) \cdot \rho_{SO_2}, \quad (7)$$

где  $kr_{SO_2}$  – концентрация сернистого газа в общем объеме рудничного воздуха;  $k_{SO_2}^i$  – концентрация сернистого газа в забое  $a_i \in A$ ;  $\rho_{SO_2}$  – плотность сернистого газа ( $2,86 \text{ кг/м}^3$ );

Динамика содержания аммиака  $CI_i$ :

$$\frac{dCI_i}{dt} = r_i(t) \cdot k_{V_{NH_3}} + rd_i(t) \cdot krd_{NH_3}^i - k_{NH_3}^i \cdot V_i^{OT}(t) \cdot \rho_{NH_3}, \quad (8)$$

где  $k_{V_{NH_3}}$  – концентрация аммиака в общем объеме рудничного воздуха;  $rd_i(t)$  – газ, образующийся в результате работы двигателя внутреннего сгорания в забое  $a_i \in A$ ;  $krd_{NH_3}^i$  – концентрация аммиака в газе, образованном двигателем внутреннего сгорания;  $k_{NH_3}^i$  – концентрация аммиака в забое;  $\rho_{NH_3}$  – плотность аммиака ( $0,7714 \text{ кг/м}^3$ ).

Изменение количества водорода  $CV_i$ :

$$\frac{dCV_i}{dt} = ok_i(t) \cdot kok_{H_2}^i - k_{H_2}^i \cdot V_i^{OT}(t) \cdot \rho_{H_2}, \quad (9)$$

где  $ok_i(t)$  – общий объем веществ, который выделяется при зарядке аккумуляторов в забое  $a_i \in A$ ;  $kok_{H_2}^i$  – концентрация водорода в газе, образованном при зарядке аккумуляторов;  $k_{H_2}^i$  – концентрация водорода в забое  $a_i \in A$ ;  $\rho_{H_2}$  – плотность водорода ( $0,0899 \text{ кг/м}^3$ ).

Концентрации веществ в атмосфере забоя рассчитываются как отношение количества газа в забое к суммарной массе газов забоя.

Для численного расчета по модели применялся метод Рунге-Кутты 4-го порядка точности.

## 6. Выводы

В данной работе проведен анализ существующих подходов к управлению вентиляцией горнодобывающих предприятий, который позволил определить, что для оптимального управления состоянием атмосферы тупиковых забоев необходима динамическая модель прогноза ее изменения. В рамках решения этой задачи были разработаны подходы к формализации структуры вентиляционной системы горнодобывающего предприятия в виде графовой логико-формальной модели и на ее основе формализованы уравнения динамической модели, инвариантной к структуре вентиляционной системы.

Использование результатов работы позволяет решить проблему оптимального управления состоянием тупиковых забоев шахт, снизить затраты на электроэнергию горнодобывающих предприятий.

## Литература

1. Типовое руководство по оборудованию и эксплуатации унифицированной телекоммуникационной системы диспетчерского контроля и автоматизированного управления горными машинами и технологическими комплексами (УТАС) в угольных шахтах. – 100 с.
2. Granch МИС – многофункциональная свободно конфигурируемая измерительная система: официальный сайт НПФ «Гранч» [Электронный ресурс]: – 2009. – Режим доступа к странице: <http://www.granch.ru>.
3. Уголь Донбасса, Доступ: <http://coal.in.ua/gornoe-delo/ventiljacija-osvewenie-i-vodootliv/2261-sostav-i-svojstva-rudnichnogo-vozduxa.html> (доступен с 2011).

## Abstract

*This article deals with the main challenges in the field of automatic control of ventilation for mining. The main purpose of this study is to reduce the accident rate and energy consumption by mining operations through the use of a system for quickly and easily management of ventilation.*

*Approaches to the formalization of the structure of the ventilation system in a mining enterprise graph logical formal model as part of this work were developed and were used the dynamic model equal an being invariant to the ventilation system structure were formalize. The developed model makes it possible to implement better and more rapid response to changes in atmospheric conditions in the mine shaft. Using of the results of the work can allows to solve the problem of optimal control of the state faces stub shafts, as well as to reduce energy costs of mining companies. The research results can be applied to mining operations, which one gas-hazardous.*

**Keywords:** mine, ventilation, graph, mine development, modeling